

システム研究グループ

グループメンバー(2025年4月)

グループリーダー・主席研究員	秋元 圭吾	主任研究員	原田 洋
サブリーダー・副主席研究員	永田 敬博	主任研究員	中野 優子
主席研究員	小田 直樹 (企画調査グループ兼務)	主任研究員	大西 尚子
副主席研究員	藤崎 亘	主任研究員	橋本 照子
主任研究員	和田 謙一	研究員	樹田 仁次
主任研究員	長島 美由紀	研究員	安藤 輝尚
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	Jubair Sieed
主任研究員	佐野 史典	研究助手	山本 清美
主任研究員	林 礼美	研究助手	斎藤 美三子
主任研究員	伏見 温子	研究助手	工藤 幸子
主任研究員	望月 則孝 (企画調査グループ兼務)	研究助手	南村 良子

システム研究グループの研究活動報告

システム研究グループは、システム的な思考、システム的な分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行ってきた。

2025年2月に、第7次エネルギー基本計画¹⁾、地球温暖化対策計画²⁾、GX2040ビジョン³⁾が閣議決定された。RITEでは、これらのそれぞれの議論において、モデルを用いた定量的なシナリオ分析を提示し、計画策定への支援材料を提供した。本報告では、エネルギー基本計画の議論において提示したシナリオ分析について解説する。

1. エネルギー基本計画に関するシナリオ分析の背景

2015年末の気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)で合意された「パリ協定」⁴⁾が2016年11月に発効した。パリ協定では、全球平均気温上昇を産業革命以前比で2℃を十分下回るようにし、1.5℃未満も追求するとされた。その後、2021年11月には第26回締約国会議(COP26)が英国グラスゴーで開催され、世界の平均気温の上昇を1.5℃に抑える努力を追求することを決意すると合意した。一方で、パリ協定で規定されている各国が自主的に誓約する排出削減目標(Nationally Determined Contributions: NDCs)の深掘りは進んでおらず、NDCsがすべて達成されたとしても、1.5℃のみならず、2℃目標の排出経路

とも大きなギャップが残っている⁵⁾。しかも、足下での排出推移からは多くの国でNDCs達成が難しいと見られる状況になってきている。国際社会は、気候変動対策の強化の必要性については概ね認識を一にしているものの、具体的な対応については温度差がある。グローバルでカーボンニュートラル(CN)の達成を目指すうえでは、各国の掲げる野心や政策強度の違いによる、競争上の不公平性を是正し、カーボンリーケージを防止したうえで対応していく必要がある。

日本政府は、2019年6月に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」⁶⁾を策定し、そこでは「21世紀後半のできるだけ早い時期に実質ゼロ排出を目指す」とした。そして、2020年10月には、菅首相(当時)が所信表明演説で「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。また、2021年に地球温暖化対策計画を改定し⁷⁾、2030年のNDCsとしての温室効果ガス(GHG)排出削減目標を、従来の2013年度比26%減から46%減と変更した。そして更に50%減の高みを目指すともした。

他方、2022年にはエネルギー安全保障・安定供給の問題が顕在化した。ロシア・ウクライナ情勢からの化石燃料価格高騰や、2022年3月の電力需給逼迫等により、エネルギー安全保障・安定供給の課題を再認識し、岸田首相(当時)の下、2023年2月には「GX(グリーントラ

ンスフォーメーション)実現に向けた基本方針⁸⁾が閣議決定された。

このような中、2024年12月には、第7次エネルギー基本計画¹⁾、地球温暖化対策計画²⁾、GX2040ビジョン³⁾が策定され、2025年2月に閣議決定がなされた。そこでは、2035年および40年のGHG排出削減目標をそれぞれ60%減、73%減(いずれも2013年度比)とするとされ、2025年2月に日本のNDCとして国連気候変動枠組条約(UNFCCC)への提出もなされた。これら計画等は、気候変動への取り組みが国内外で強化される一方で、エネルギー安全保障・安定供給リスク、また、気候変動対応や貿易関係などの様々なリスクが顕在化してきていることへの対応の強化が必要になってきていることにも対応したものであり、産業政策とエネルギー、気候変動対策を一体的に実施していこうとするものである。

2. カーボンニュートラルに向けた対策の概要

第7次エネルギー基本計画等の分析においても、これまでの日本政府の方針に沿って、原則2050年までのCNを前提とした分析が要請された。そこで、モデル分析の解説の前に、本節では、CN実現のための対策の全体像を確認しておきたい。

CNの実現について、一次エネルギー供給の視点で記載したのが図1である。CNはエネルギーの脱炭素化が不可欠であるが、脱炭素化に貢献し得る各エネルギーには、技術的、社会的、経済的な制約がある。そのため、全体コストの最小化の視点も踏まえると、省エネルギー(省エネ)はCN実現においても重要である。個別の技術の省エネを超えて、シェアリング経済、サーキュラー経済の実現をもたらすような、デジタルトランスフォーメーション(DX)による社会変化が重要になってくると考えられる。

その上で、一次エネルギーとしては、原則、再生可能エネルギー(再エネ)、原子力、CO₂回収貯留(CCS)付きの化石燃料・もしくはCO₂除去(CDR)技術で構成することが必要となる。そして、最終エネルギーとしては、電化を進めることが重要なCN対策となる。電力は原子力

や再エネ等の直接的な対策がある一方、非電力はこの後に説明する水素系エネルギー等への転換が必要なため、高コストになりやすい。そのため、ヒートポンプ給湯器や電気自動車など、電化を促進することは重要である。他方、電化に不向きな高温の需要用途も多く存在するし、個人需要家は多様で一様の電化は物理的にも経済的にも難しく、エネルギー種を適切に組み合わせることが重要となる。

また、太陽光や風力発電の変動性の再生エネ(VRE)は、大量に導入すると時間帯によっては余剰になることが多いため、蓄電池等への貯蔵とともに、水素エネルギーへの転換も重要な対策となり得る。ただし、国内の太陽光、風力発電は、一般的に、海外に比べてコストや量の制約が大きいため、経済合理性の点から、海外の再エネやCCS付きの化石燃料を水素に転換した上で活用することも考えられる。更に、利便性を高めるため、窒素や回収したCO₂の炭素を水素に付加して、アンモニアや合成メタン(e-methane)や合成燃料(e-fuels)にして利用することも重要性が高いと考えられる。e-methaneやe-fuelsは、CO₂を回収し水素と合成するプロセスが追加的に必要なものの、水素を直接運ぶためには液化水素等にする必要があるが、それよりも安価に運ぶことができる。また、既存のガス・石油インフラ、そして既存のガス機器や内燃機関自動車等を利用しながら、CNを実現できるという長所がある。いずれにしても、水素や水素系エネルギーは、電力同様、二次エネルギーとして様々な一次エネルギーから製造でき、また、多くの利用先があり、そして実質ゼロ排出を実現し得る。なお、後述のモデルを用いた経済計算からは、水素や水素系エネルギーは、海外輸入が支配的となっている。

モデル分析では、CNに至る移行過程も含め、各種エネルギーのコスト・ポテンシャルの想定の下、国内のみならず、国外からの輸入を含めて、費用最小となるエネルギーシステムを導出している。

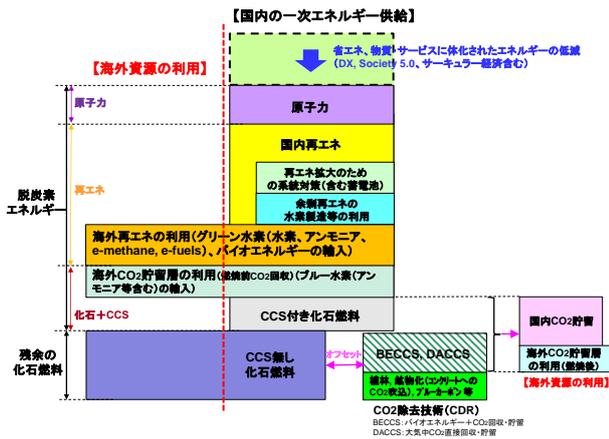


図1 CNに向けた対応概要:一次エネルギー供給

3. シナリオ想定と分析手法

3.1. シナリオ想定

シナリオ分析の手法、モデルの概要を説明する前に、政府審議会に提示したシナリオの概要について解説する。表1に想定したシナリオを示す(審議会には、これに加え、「原子力ゼロシナリオ」も提示しているが、紙面の都合により割愛した)。表1には第7次エネルギー基本計画のエネルギー需給見通しでのシナリオ名との RITE シナリオ名との関係性についても記載している。また図2に、これらシナリオの位置づけを示す。エネルギー基本計画は、将来のこうありたい目標を示す性格のものであるため、RITE が分析し審議会に提示した、こうなってしまう恐れがあるというリスク発現シナリオである、「低成長シナリオ」は含まれていないことに注意されたい。

原則的に、既往の政府目標である 1.5°C、2050 年 CN、2030 年▲46%を想定した。その上で、2040 年については政府から提示の▲73%(線形削減)を想定した。技術進展が、革新的に幅広く急速に進み、また技術普及と障壁も小さいと想定したシナリオが「成長実現シナリオ」であり、「低成長シナリオ」では、技術進展が漸進的に留まると想定した。この時の経済リスクを回避し、排出量制約を少し緩和し、炭素価格でシナリオ分析を行ったのが、「排出上振れリスクシナリオ」である。このとき、炭素価格は、NGFS の 3 モデルによって策定された、2050 年 CN シナリオである Net Zero 2050 の炭素価格の平均値を採用した。

3.2. 分析手法・モデル概要

本節では分析手法・モデル概要について記載する。モデルの詳細については、各シナリオにおける詳細な技術の将来見通し想定とあわせて、文献(9, 10)等を参照されたい。図3に、シナリオ分析の流れを記載した。

表1 想定したシナリオ

排出削減シナリオ	RITE シナリオ名	政府需給見通しシナリオ名	シナリオ概要
2040年▲73%+2050年CN (世界1.5°C未満)	成長実現シナリオ	革新技術拡大	排出削減対策が広範囲に進展する。国際的な排出削減協定も絡んで、日本の国際的な相対的エネルギー価格差が顕著に収まる。日本の温暖化対策技術が海外にも広く普及。経済と環境の好循環を実現し得る。
	再エネシナリオ	再エネ拡大	再エネの社会共生制約小・コスト低減加速
	水素系燃料シナリオ	水素・新燃料活用	合成メタン(e-methane)・合成燃料(e-fuels)・アンモニアを含め、水素系エネルギーのコスト低減加速
	CCSシナリオ	CCS活用	CO ₂ 貯留の社会障壁小。経済合理的な範囲で広範囲に普及
【極端リスク】低成長シナリオ(参考)	—	—	技術進展が漸進的。CN対策のため、他国との日本の国際的な相対的エネルギー価格差が拡大。産業の海外移転進展し、経済の大規模な停滞リスク発現
炭素価格シナリオ:技術進展等の不確実性下でのリスク対応の経済と環境の好循環シナリオ	排出上振れリスクシナリオ	技術進展	技術進展は「成長実現シナリオ」相当が実現できず、再エネ、CCS-CDR、水素系エネルギー、原子力等の技術進展・普及が抑制的。そのため、海外との相対的エネルギー価格差が広がることから、経済と環境の好循環維持のため、炭素価格政策水準も抑制的となる社会像

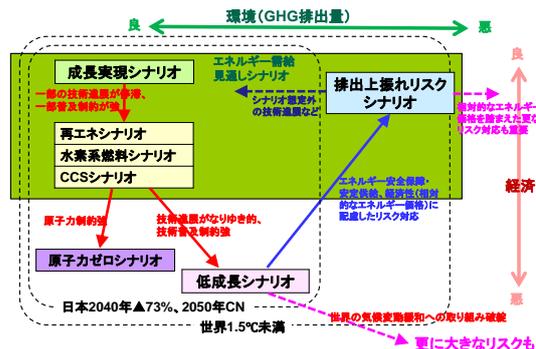


図2 各シナリオの位置づけ

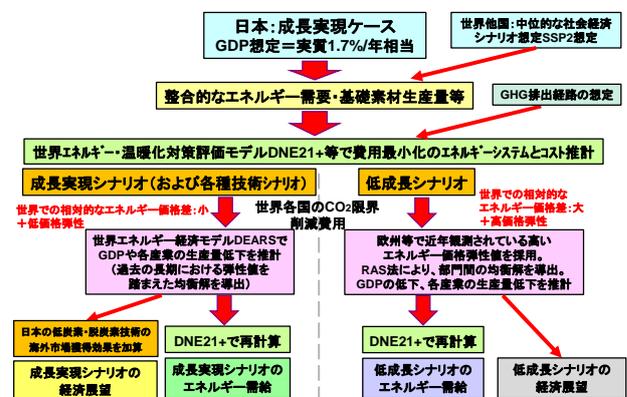


図3 シナリオ分析の流れ

エネルギーシステムの分析は、世界エネルギー・温暖化対策評価モデル DNE21+を用いた。DNE21+は、世界を 54 地域に分割し、2000～2100 年の間を動的に評価するモデルである。技術積み上げ型のモデルであり、エネルギー供給側のみならず、エネルギー多消費産業、家庭、運輸など需要側について多くの技術が積み上げ評価されており、具体的な対策を提示可能である。

DNE21+はエネルギーシステムのみを評価する部分均衡型モデルであり、マクロ経済全体への影響は評価できない。現状では、海外との相対的なエネルギー価格差も手伝って、エネルギー多消費産業を中心に、先進国から途上国への移転が進んできている。しかし、DNE21+では、外生的に鉄鋼や化学等の生産量シナリオを想定するため、生産量自体の海外移転を内生的に評価できない。そこで、図3に示すように、一般均衡型の世界エネルギー経済モデル DEARS も用いてシナリオ分析を行った。DEARS モデルは、国際産業連関表 GTAP をベースに構築しているが、最近では、欧州等で電力・エネルギーの価格弾性が高まっている観測も見られている。グローバル化した世界の中、相対的なエネルギー価格差に企業は早い対応をしている可能性がある。GTAP データベースは整備に時間遅れが大きく、最近の状況を反映できていない可能性もある。そこで、「低成長シナリオ」では、エネルギーの価格弾性が高い報告の数値(▲1.0)を採用し分析した。これら推計結果から、DNE21+モデルのエネルギー多消費産業・輸送機械産業の生産量の見通しを修正、再度計算し、エネルギーシナリオを提示した。

4. 分析結果

本節では、シナリオ分析結果を示す。

4.1. コスト・経済影響

表 2 に CO₂ 限界削減費用を示す。

「成長実現シナリオ」であっても、2040 年▲73%、2050 年 CN を実現するにはかなり高い費用が必要になると分析される。実現のためには、本分析で想定できなかったような更なるイノベーションも必要とも考えられる。

「低成長シナリオ」では、CO₂ 限界削減費用のより一層

の増大が推計される。また、海外との相対的な費用も大きくなり、結果、相対的なエネルギー価格差が広がる。なお、ここでは、世界全体で 1.5℃未満を実現することを前提とした分析を行ったが、実際には、世界は斑模様であり、国によってはベースラインに近い対策しかない可能性もある。この場合、「低成長シナリオ」の電力価格と他国の電力価格は、より一層広がる可能性もあるので、ある程度、柔軟な排出削減対応も見据えることは重要である。

そのような状況に対応するシナリオが「排出上振れリスクシナリオ」であるが、「排出上振れリスクシナリオ」では、2050 年 CN(1.5℃未満)相当の炭素価格を世界全体に想定したため、CO₂ 限界削減費用(炭素価格)は世界一律となっており、「成長実現シナリオ」よりも若干低めの価格となっている。「排出上振れリスクシナリオ」では、技術進展が現状のペースに留まると想定したが、排出制約ではなく、一定の炭素価格での想定をしたため、エネルギーコスト、電力コストは、「成長実現シナリオ」レベルに留まっている。

表 2 CO₂ 限界削減費用

	成長実現シナリオ		再エネシナリオ		水素系燃料シナリオ		CCSシナリオ		低成長シナリオ		排出上振れシナリオ	
	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050	2040	2050
日本	301	578	369	716	467	742	396	892	538	951	257	500
米国	294	262	350	348	409	454	362	350	410	467	257	500
英国	294	317	350	387	419	558	369	452	428	579	257	500
EU	298	413	350	516	409	648	362	541	410	664	257	500
その他	294	262	350	348	409	454	362	350	410	467	257	500

単位: USD/tCO₂ (2000年価格)
注)一部の国抜粋表示

表 3 には、日本への経済影響を示す。「成長実現シナリオ」では、急速な技術進展を見込んでいるが、それでも、表 2 で見られるような高い炭素価格によって、GDP では 2040 年▲4.1%、2050 年▲5.6%が見込まれた。鉄鋼では 2040 年▲3.9%、2050 年▲11%である(たとえば、2050 年では潜在的な粗鋼生産量は 9000 万トン/年と見込んだが、▲11%によって 8000 万トン/年に低下)。ただし、世界が 1.5℃目標に向けて取り組む場合には、環境調和製品等の海外市場の獲得効果も

期待され、推計には大きな不確実性が存在するものの、5%ポイント程度の上昇が見込まれた。そのため、潜在的な経済成長の見通し程度(2040年では若干の増)を実現し得るシナリオとなっている(2023~40年の経済成長率は人口低減効果を織り込んで1.5%/年の推計)。

「低成長シナリオ」では、技術進展が漸進的であることから、日本は相対的に安価な脱炭素エネルギーへのアクセスが海外に比べて一層乏しい状況となり、結果、海外との相対的なエネルギー価格差が広がり、海外への産業移転が大きくなる可能性が示されている。鉄鋼、化学産業では、ベースラインに比べ40%程度の極めて大きな生産量の低下が推計される。また、自動車産業(輸送機械)でも、同様の水準の生産量低下が推計される。GDP全体でも、13~14%程度とかなり大きな低下となる。技術進展がそれほど進まない中で、2050年CNに向けて直線的に排出削減を進めれば、「低成長シナリオ」の分析結果が示すような世界は十分起き得ると考えられる。これを避けるためのシナリオが「排出上振れリスクシナリオ」である。

表3 日本への経済影響:成長実現・低成長・排出上振れリスクシナリオ

ベースラインからの低減率	成長実現シナリオ (DEARS)		低成長シナリオ (価格弾性: ▲1.0, 所得弾性: 1.0 + RAS法)		排出上振れシナリオ (DEARS)	
	2040	2050	2040	2050	2040	2050
鉄鋼 (生産量 [億トン/年])	-3.9% (0.86)	-11.0% (0.80)	-41% (0.53)	-46% (0.49)	-3.6% (0.86)	-11.0% (0.80)
化学	-3.7%	-11.2%	-35%	-40%	-3.3%	-10.7%
窯業土石(セメント含)	-2.1%	-2.7%	-30%	-34%	-1.7%	-3.8%
非鉄金属	-1.4%	-2.7%	-35%	-39%	-1.2%	-5.0%
紙パ	-3.5%	-6.3%	-33%	-37%	-3.1%	-7.2%
輸送機械	-4.1%	-6.9%	-42%	-47%	-4.7%	-8.2%
GDP (CO2削減技術の海外市場獲得効果含まず)	-4.1%	-5.6%	-13%	-14%	-3.6%	-5.9%
GDP, GNI (海外市場獲得効果含む)	内閣府「成長実現ケース」の一人当たりGDP成長率を若干上回る水準 (海外市場獲得効果+4%~+5%程度)		上記とほぼ同様 (海外市場獲得効果は期待できず)		内閣府「成長実現ケース」の一人当たりGDP成長率とほぼ同等の水準 (海外市場獲得効果+3~4%程度)	
経済成長率: 2023年からの年成長率 ※人口低減見込みが含まれる	+1.5%/年	+1.2%/年	+0.6%/年	+0.7%/年	+1.4%/年	+1.2%/年

「排出上振れリスクシナリオ」では、技術進展が「成長実現シナリオ」のように急速に進まず、「低成長シナリオ」と同程度の想定であり、このシナリオにおいては、排出量が上振れする(2040年▲61%、2050年▲79%)ものの、経済影響としては、「成長実現シナリオ」と大差のないものと推計された。経済活動の大きな落ち込み、また、炭素制約による産業の海外移転は避けるべきで

あり、そのようなリスクに対応し得るシナリオとなっている。

4.2. エネルギー需給

図4に日本の一次エネルギー供給量を示す。一次エネルギー供給量は、2040、2050年にかけて、いずれのシナリオでも大きな低減が見られる。再エネの拡大、CCSの利用が経済合理的であり、また、水素、アンモニア、e-methane、e-fuelsの輸入も経済的な対策と評価された。「低成長シナリオ」では、一次エネルギー供給量、発電電力量ともに相当抑制的となる。他方、「排出上振れリスクシナリオ」では、水素系エネルギーの輸入は小さくなり、LNGはほぼ現状水準が経済合理的となっている。

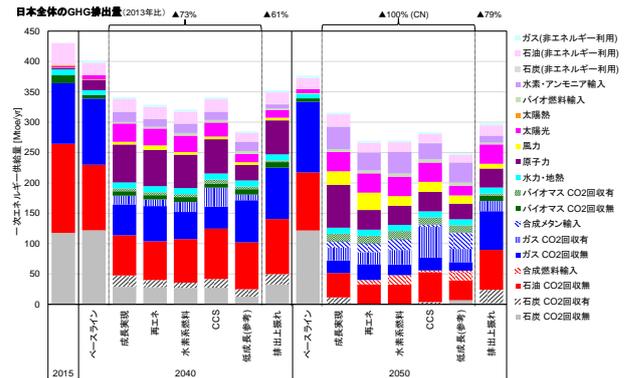


図4 日本の一次エネルギー供給量

図5に日本の最終エネルギー消費量を示す。電化率を高めることが経済合理的な対策であり、最終エネルギー消費量の大幅な低下が求められる。他方、産業、民生、運輸のどの部門においても、完全な電化は経済合理的ではなく、水素、アンモニア、e-methane、e-fuels、バイオ燃料も組み合わせることが経済合理的となっている。最終エネルギー消費量計では、2040年の電化率は、▲73%シナリオでは38~44%、2050年CN時では54~57%となっている。

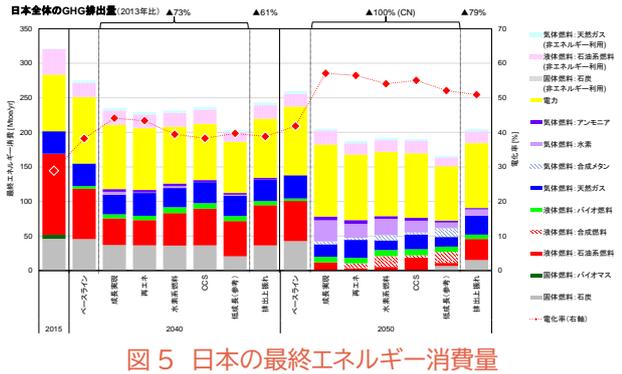


図5 日本の最終エネルギー消費量

発電電力量(図6)は、本来、IT需要等で潜在的には増大が見込まれるが、相対的に高いエネルギー価格となれば、産業の海外移転を含め、生産量が低下しながら、エネルギー消費量を抑制することが必要になる。経済性の高い電源投資には長いリードタイムも必要なことが多く、電力需給逼迫をしないためにも、「低成長シナリオ」を実現しない予見性の高いエネルギー・気候変動政策が重要と言える。

「排出上振れリスクシナリオ」では、2050年までは、LNG発電(コージェネ、CCS付き含む)の比率は現状レベル程度が経済合理的な結果となっている。

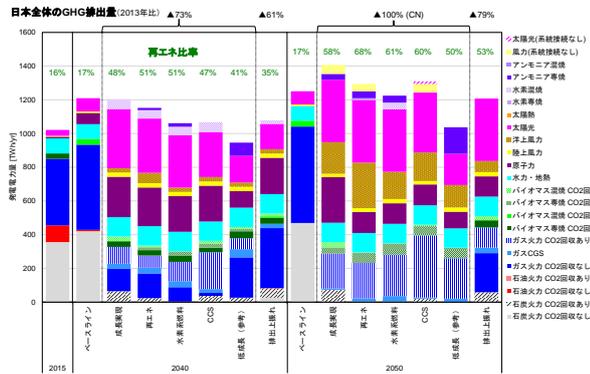


図6 日本の発電電力量

図7に部門別の最終電力消費量を示す。いずれのシナリオも2040年に向けて電力需要は増大が見られる。また、2050年に向けては、IT需要、電化需要の一層の高まりにより、さらに増大が推計される。「成長実現シナリオ」では、2040年1081、2050年1210 TWh/年である。2040年については、「水素系燃料シナリオ」、「CCSシナリオ」は、CO₂限界削減費用が他シナリオより

も相対的に高いことから、電力需要も相対的には抑制的になっている。「低成長シナリオ」では、高いエネルギー価格によって、需要が相当抑制的になると見られる。

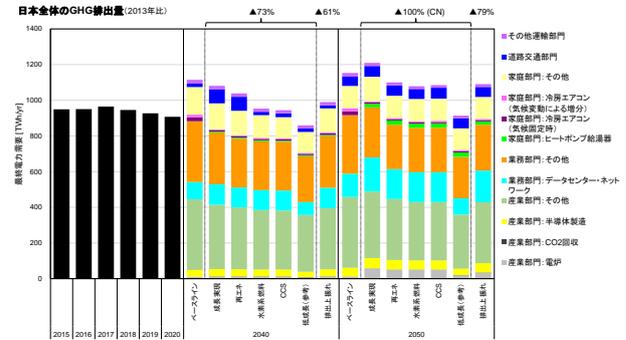


図7 日本の部門別最終電力消費量

図8および9に、それぞれ、日本におけるCO₂および水素のバランスを示す。2050年においては、多くのシナリオにおいて、大気中CO₂直接回収・貯留(DACCS)も経済的な対策と評価されている。水素は、海外からの輸入が経済的と評価され、発電、鉄鋼、その他部門での多様な利用が推計されている。なお、先に記載のように、水素直接以外にも、アンモニア、e-methane、e-fuelsの輸入、利用も経済合理的な対策と評価されている。

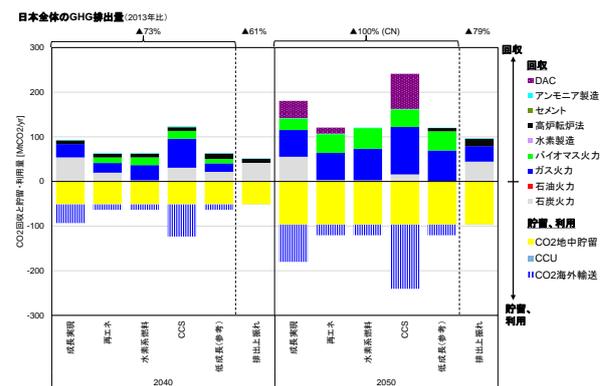


図8 日本のCO₂バランス

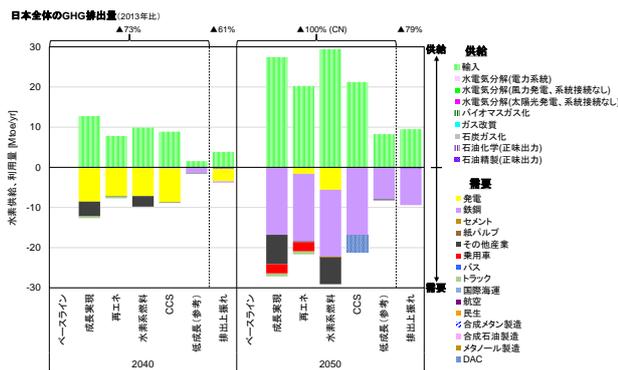


図 9 日本の水素バランス

5. まとめと政策的な含意

RITE では、世界モデルである DNE21+、DEARS モデル等を用いて、複数のシナリオを想定して、2050 年 CN に向けた日本のエネルギーシステム分析を行った。エネルギー需給と価格の均衡解となっている。経済と環境の好循環の実現のためには、海外との相対的なエネルギー価格差への着目は重要と考えられ、それを考慮した分析を実施した。

世界は、1.5℃や 2050 年 CN の意欲的な目標を掲げて取り組んできているものの、足下の排出量には大きなギャップが見られている。また、日本を含めて、排出削減が相応に進んでいる国でも、エネルギー多消費産業などの製造業の生産量の低下、海外への移転を伴って、むしろその影響の方が大きく排出削減が実現しているケースも見られる。「成長実現シナリオ」は目指したい姿ではあるが、気候変動問題はグローバルでの対策が必須であるため、国際的な協力なくして効果はない。「成長実現シナリオ」は、ナローパスであることも認識し、「低成長シナリオ」の顕在化リスクに備えたエネルギー戦略も求められる。

これら RITE の分析は、第7次エネルギー基本計画のエネルギー需給見通し策定の主要な引用元とされた。第7次エネルギー基本計画は、リスク対応の「排出上振れリスクシナリオ」を含めた、複数シナリオの提示の下で、CN を目指しつつも、エネルギー安定供給、経済性にも配慮した戦略となっていると考えられる。

参考文献

- 1) 日本政府:「第7次エネルギー基本計画」(2025)
<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218001/20250218001.html>
- 2) 日本政府:「地球温暖化対策計画」(2025)
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/250218.html>
- 3) 日本政府:「GX2040 ビジョン」(2025)
<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218004/20250218004.html>
- 4) UNFCCC: Paris Agreement (2015)
https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- 5) UNEP: Emissions Gap Report 2024 (2024)
<https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>
- 6) 日本政府:「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(2019)
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/senryaku.pdf>
- 7) 日本政府:「地球温暖化対策計画」(2021)
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>
- 8) 日本政府:「GX 実現に向けた基本方針」(2023)
<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>
- 9) RITE システム研究グループ:「DNE21+モデルを含む RITE のシナリオ分析モデルの概要」(2024)
<https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/DNE21plusmodeloverview.pdf>
- 10) 秋元他:「2050 年カーボンニュートラルに向けた我が国のエネルギー需給分析」(2024)
<https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/RITE2040cnenergyanalysis.pdf>